

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ОБЩЕЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

**«Анализ распадов топ кварков в pp соударениях на Большом адронном
коллайдере»**

Выполнил студент

213М группы

Волков Игорь Олегович

Научный руководитель:

д. ф.-м. н., профессор

Смирнова Лидия Николаевна

Допущен к защите _____

Зав. кафедрой _____

Москва

2021

Оглавление

Введение	3
Глава 1. Физика топ кварков	5
Глава 2. Эксперимент ATLAS.....	11
Глава 3. Анализ распадов топ кварков в pp соударениях на Большом адронном коллайдере	15
3.1. Критерии отбора событий для анализа	15
3.2 Идентификация b -струй.	17
3.2.1 Метод MV1 для анализа данных с энергией 8 ТэВ.	17
3.2.2 Метод MV2 для анализа данных с энергией 13 ТэВ.	18
3.3. Общие характеристики событий с рождением пары топ кварков.....	20
3.4. Характеристики W – бозона от распада топ кварка по лептонному каналу.....	24
Глава 4. Измерение массы топ кварка из наблюдаемых величин.	28
4.1. Методика определение массы топ кварка в эксперименте ATLAS в pp соударениях при 8 ТэВ. Метод шаблонов.	28
4.2. Расчет поперечной массы топ кварка.....	29
4.3. Определение массы топ кварка и W - бозона по инвариантной массе трех и двух струй, соответственно.....	31
4.4. Расчет массы топ кварка по инвариантной массе трех струй в событиях с четырьмя струями.....	34
Заключение	37
Список литературы.....	38

Введение

Согласно Стандартной модели элементарных частиц, все вещество состоит из 12 фундаментальных частиц: 6 фермионов (лептоны и нейтрино) и 6 кварков (u, d, s, c, b, t). Каждой фундаментальной частицы соответствует одна античастица. Кварки участвуют в сильных, слабых и электромагнитных взаимодействиях. Самым тяжелым среди всех фундаментальных частиц является t-кварк. Его масса равна $172,5 \pm 0,5^1$.

Топ кварк впервые был открыт в эксперименте на коллайдере Тэватрон в американской лаборатории Фермилаб в 1994 – 1995 годах. Официальное объявление об его открытии состоялось 2 марта 1995 года. Это было важным событием для научной общественности.

До запуска Большого адронного коллайдера (БАК) Тэватрон был единственным в мире экспериментальным комплексом, где могла родиться пара t - кварков. В настоящее время топ кварки исследуются только на БАК. Открытие t - кварка, многие свойства которого были предсказаны Стандартной моделью, окончательно подтвердило реальность кварков. БАК является «фабрикой топ кварков», благодаря большой энергии соударений сечение рождения пар топ кварков возросло от 8 до 800 пб, а светимость возросла на порядок. Это увеличение позволяет нам регистрировать больше событий.

В настоящее время исследование t – кварка продолжается. Одним из основных направлений исследований является определение его массы. Масса t - кварка является важным параметром Стандартной модели. Точные измерения его массы обеспечат нас важной информацией для подгонки многих электрослабых параметров, которые помогают оценить внутреннюю согласованной Стандартной модели и проверить разные варианты ее

¹ T.M. Liss, F. Maltoni, A. Quadri The Top Quark (2017)

расширения. Кроме того, значение массы t -кварка влияет на устойчивость потенциала Хиггса.

Актуальность данной работы заключается в исследовании и сравнении событий с рождением пары топ кварков в pp соударениях при энергиях 8 и 13 ТэВ, зарегистрированных в эксперименте ATLAS. ATLAS – один из двух экспериментов общего назначения на БАК, на котором в 2012 году был открыт бозон Хиггса.

Целью работы является исследование характеристик событий с рождением пар топ кварков и феноменологическая оценка массы топ кварка и W - бозона по результатам измерений на БАК.

В работе использованы данные, которые были предоставлены экспериментом ATLAS в открытое пользование.

Структура работы состоит из теоретического описания физики топ кварков, краткого описания эксперимента ATLAS, характеристики наборов событий, представленных в открытых данных ATLAS и результаты измерения на основе этих данных. В заключении представлены расчеты массы топ кварка и W – бозона на основе данных, полученных на эксперименте ATLAS в 2012 и в 2016 годах при энергии 8 и 13 ТэВ соответственно.

Глава 1. Физика топ кварков

Топ кварк – кварк с зарядом $q = +2/3 e$, принадлежащий к третьему поколению кварков. Имея массу $173.1 \pm 0.6 \text{ ГэВ}^2$, t – кварк, является наиболее массивным среди всех частиц стандартной модели, его масса близка к массе ядра рения. Время жизни топ кварка составляет около $5 \cdot 10^{-25}$ секунды, что на порядок меньше временной шкалы сильного взаимодействия ($\approx 3 \cdot 10^{-24}$ секунды). Ввиду короткого времени жизни он не успевает после возникновения адронизироваться и ведет себя как «голый» кварк. Таким образом не существует адронов, содержащих валентный топ кварк.

Топ кварк впервые был замечен в эксперименте на Тэватроне (Фермилаб, США). Поиск t – кварка продолжался около 20 лет, но большая часть экспериментальных данных была набрана в 1994 году. 2 марта 1995 года было официально объявлено на семинаре в Фермилаб об открытии топ кварка.

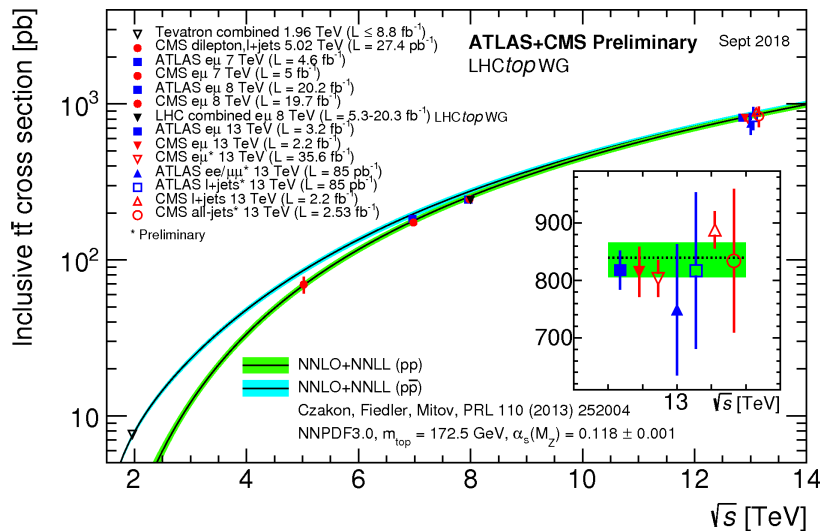


Рис. 1.1. Сечение рождения пары топ-анти топ кварков на Большом адронном коллайдере при разных энергиях соударения и Тэватроне.

Эксперимент на Тэватроне имел энергию сталкивающихся протон – протонной пары в системе центра масс равную 1.96 ТэВ. При такой энергии пары топ кварков рождаются с сечением равным около 7 пикобарн, что

²C. Patrignani et al. (Particle Data Group), Chin. Phys. C, 40, 100001 (2016)

совпадает с предсказаниями Стандартной Модели. Данные сечения рождения пары $t - \bar{t}$ – кварков в разных экспериментах представлены на рис. 1.1. Открытие $t - \bar{t}$ – кварка, многие свойства которого были предсказаны Стандартной Моделью, окончательно подтвердило реальность кварков.

До запуска Большого адронного коллайдера Тэватрон был единственным в мире экспериментальным комплексом, где могла родиться пара топ кварков. На Большом адронном коллайдере одной из основных направлений является исследование топ – физики. Исследования производятся на двух экспериментах: ATLAS и CMS. Последние измерения проводившиеся в 2016 году имеют данные, превышающие сечение рождение пары топ кварков на Тэватроне на 2 порядка. Данные о сечении рождения пары топ кварков на Большом адронном коллайдере представлены на рис. 1.2. Последнее значение сечения измерено при 13 ТэВ и равно 832 пикобарн.

σ [pb]	$t\bar{t}$	t-channel	tW	s-channel	ggH
Tevatron	7.0	2.08	0.22	1.046	-
LHC @ 7TeV	177.3	63.89	15.74	4.29	15.31
LHC @ 8TeV	252.8	84.69	22.2	5.24	19.47
LHC @ 13 TeV	831.7	216.99	71.2	10.32	44.14

Рис. 1.2. Сечение рождения пары топ-анти топ кварков при разных энергиях соударения на Большом адронном коллайдере³.

На Большом адронном коллайдере топ – физика является одним из основных направлений исследований⁴. Топ физика имеет большой спектр направлений, в которых изучается физика топ кварков. Одним из них является определение массы топ кварка.

На рис. 1.3 представлены экспериментальное значение массы топ кварка равное $173.34 \pm 0,76 \text{ ТэВ}$ ⁵. Данные были собраны на Большом адронном

³ Rebeca Gonzalez Suarez LHC results on Top Quark Physics // 2018.

⁴ Л.Н. Смирнова. “Эксперимент ATLAS Большого адронного коллайдера” Москва, 2014

⁵ The ATLAS Collaboration Top Working Group Summary Plots —2019 // ATLAS PUB Note. 2019.

коллайдере при энергиях 7, 8 и 13 ТэВ. Исследований с использованием данных с энергией 13 ТэВ небольшое количество, это связано с тем, что набор данных все еще проходит, но уже видна тенденция, что при достаточно большой энергии столкновения, погрешность измерений значительно уменьшается.

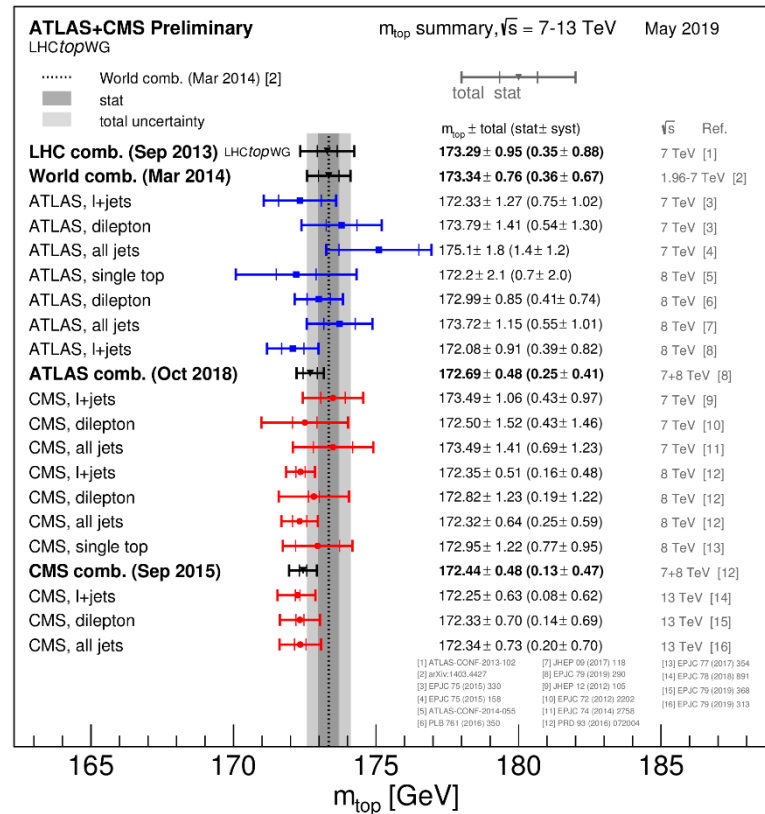


Рис. 1.3. Экспериментальные значения массы топ кварка, полученные на экспериментах ATLAS и CMS при энергиях 7, 8 и 13 ТэВ на Большом адронном коллайдере используя разные каналы распада топ кварка.

Вычисления массы топ кварка происходило несколькими методами, в зависимости от канала распада пары топ кварков. В событиях с дилептонным и струйными распадами пары топ кварков заметна большая погрешность по сравнению с исследованием лептон – струйного канала распада.

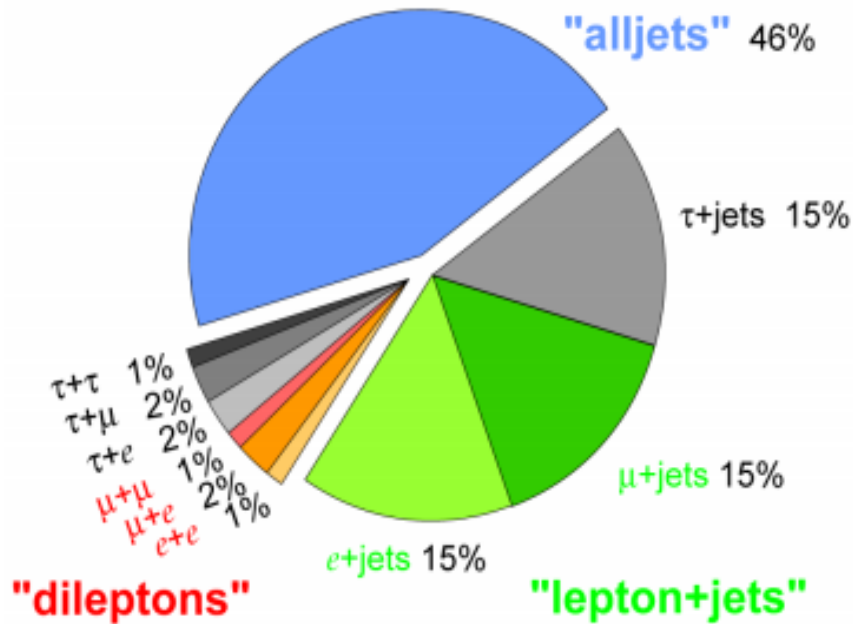


Рис 1.4. Каналы распада t - кварка

Другим направлением в физике топ кварков является изучение распадов топ кварков. Основным каналом распада, который имеет вероятность $\approx 100\%$ является $t \rightarrow bW$, где W имеет 4 канала распада: на пару кварк-антикварк и 3 канала распада на лептон и нейтрино⁶. Вероятности каналов распада пары топ кварков представлены на рис. 1.4.

Рассмотрим каналы распада топ кварка. Его основная нода - $t \rightarrow bW$, где W распадается либо по адронному, либо по лептонному каналу распада. Из этого следует, что распады пары топ-антикварк кварков можно разделить на 3 канала распада: адронный, дилептонный и адронно-лептонный. На рис. 1.4 изображены вероятности всех каналов распада пары топ-антикварк.

Одним из направлений физики топ кварков является изучение рождения топ кварков. Изучаются рождение топ кварков за счет сильно взаимодействия, а также EW – взаимодействий (рождение одиночных топ кварков) и рождение совместно с бозоном Хиггса.

⁶ K. Nakamura et al. (Particle Data Group), JPG 37, 075021 (2010)

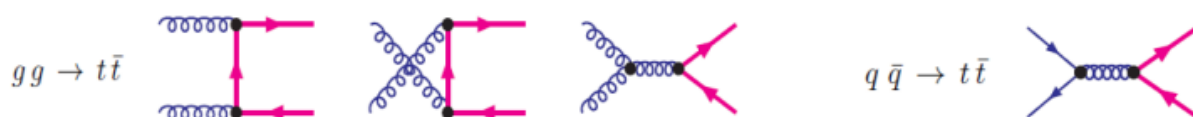


Рис. 1.5. Диаграммы образования t - кварков в лидирующем порядке КХД: глюон-глюонное рассеяние и кварк-кварковое рассеяние.

Основным вкладом в рождение топ кварков является сильное взаимодействие. На рис. 1.5 представлены варианты рождения пары топ кварков из глюона⁷. На Большом адронном коллайдере в pp взаимодействиях топ кварк образуется как в глюонном рассеянии, так и в рассеянии кварка на антикварке. Относительные вклады процессов зависят от энергии и природы пучков: на LHC доминируют глюонные рассеяния (90% событий), тогда как на Тэватроне преобладают рассеяния кварков. Расчетное сечение рождения t -кварков на LHC составляет 833 ± 100 пб. Это соответствует образованию 83 тысяч пар t - кварков на начальной интегральной светимости 100 пб^{-1} , или порядка 10^7 пар в год.

В экспериментах ATLAS и CMS на Большом адронном коллайдере одним из направлений исследования топ физики является поиск новой физики за рамками Стандартной Модели. Происходит поиск аномальных вершин tWb , а также поиск новых тяжелых частиц ($t \bar{t}$, $Y \rightarrow tX$).

Рассмотрим некоторые характеристики топ кварка, которые исследуются для уточнения констант в Стандартной Модели. Одним из них является Юкавовская константа связи. В связи своей большой массы, топ кварк имеет самую большую Юкавовскую константу связи в Стандартной Модели.

$$\gamma_t = \frac{\sqrt{2}m_t}{v} \cong 1$$

⁷ Слабоспицкий С.Р. ФИЗИКА ТОП-КВАРКОВ НА БОЛЬШОМ АДРОННОМ КОЛЛАЙДЕРЕ // Международная Сессия-конференция Секция ядерной физики ОФН РАН. 2016.

Ширина распада топ кварка также является одной из главных величин в исследовании на большом адронном коллайдере. Она равна $\Gamma = 1.35$ ГэВ и рассчитывается по формуле:

$$\Gamma_t = \frac{G_F m_t^3}{8\sqrt{2}\pi} \left(1 - \frac{M_W^2}{m_t^2}\right)^2 \left(1 + 2 \frac{M_W^2}{m_t^2}\right) \left[1 - \frac{2a_s}{3\pi} \left(\frac{2\pi^2}{3} - \frac{5}{2}\right)\right] = 1.35 \text{ ГэВ}$$

где $G_F = 1.16637 \cdot 10^{-5} \text{ ГэВ}^{-2}$, $m_t = 172.5 \text{ ГэВ}$, $a_s(m_t) = 0.118$

Глава 2. Эксперимент ATLAS.

ЦЕРН – Европейский центр ядерных исследований, в котором ведутся исследования фундаментальной структуры вселенной. Основной задачей ЦЕРН является изучение базовых компонентов материи – элементарных частиц. Ускоритель сталкивает частицы на скоростях, близких к скоростям света. Целью этого эксперимента является изучение природы взаимодействия частиц⁸.

Большой адронный коллайдер – ускоритель заряженных частиц на встречных пучках, предназначенный для ускорения протонов и тяжелых ионов. На нем ведется изучение продуктов, образовавшихся в результате соударения частиц. Большой адронный коллайдер построен в ЦЕРНе в городе Женева на границе Швейцарии и Франции. Он расположен на глубине от 50 до 75 метров, протяженность основного кольца ускорителя составляет 26 659 м. На Большом адронном коллайдере работают 4 детектора: два из которых ATLAS и CMS – детекторы общего назначения. На детекторе ALICE исследуется кварк – глюонная плазма в столкновениях тяжелых ионов свинца. А на LHCb происходит исследование распадов B –адронов.

ATLAS предназначен для исследования различных типов физики, которые могли бы быть обнаружены в энергичных столкновениях на БАК. Некоторые из этих исследований заключаются в подтверждении или улучшенных измерениях параметров Стандартной Модели, в то время как многие другие — в поисках новой физики. Общий вид детектора ATLAS представлен на рис. 2.1.

⁸ Л.Н. Смирнова. “Детектор ATLAS Большого адронного коллайдера”. Москва, 2010

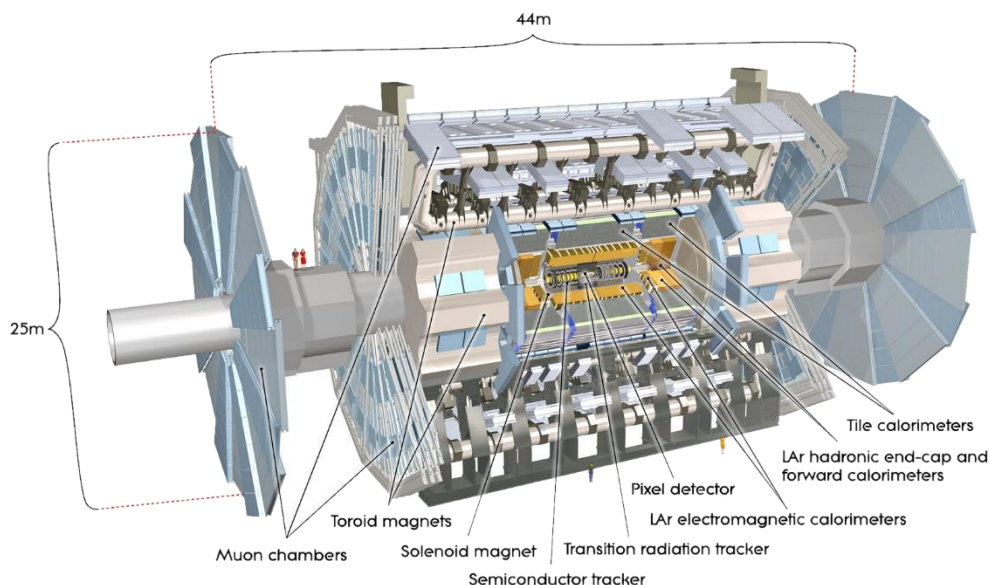


Рис. 2.1. Общий вид детектора ATLAS.

Одной из целей детектора ATLAS является исследование механизма Хиггса. Он дает массы элементарным частицам, оставляя фотон безмассовым. Если бозон Хиггса не был бы обнаружен, то ожидалось, что будут обнаружены другие механизмы нарушения электрослабой теории.

Еще одним из важнейших направлений исследования является изучение t – кварка. До открытия БАК t – кварк изучался только на Тэватроне. С намного большей энергией и большими частотами столкновений, БАК производит огромное число t – кварков, позволяя сделать намного более точные измерения его массы и сечения взаимодействия.

Так же на БАК происходит поиск новых моделей физики. Одной из популярных в данное время является суперсимметрия. Она присутствует почти во всех моделях теории струн. Различные варианты теории суперсимметрии предполагают существование новых массивных частиц, которые распадаются на кварки и другие элементарные частицы.

Детектор ATLAS состоит из ряда больших концентрических цилиндров вокруг точки взаимодействия, где сталкиваются протонные пучки

на БАК. Его можно разделить на четыре главные части: внутренний детектор, калориметры, мюонный спектрометр и магнитные системы.

Внутренний детектор находится в самом центре детектора. Его основной функцией является детектирование трека, а также определение частицы и ее импульса. Магнитное поле, окружающее внутренний детектор отклоняет заряженные частицы и направление кривой определяет ее заряд, а степень кривизны – ее импульс. Внутренний детектор состоит из пиксельного детектора, полупроводниковой системе слежения и трекового детектора переходного излучения.

Пиксельный детектор состоит из трех слоев и трех дисков, на которых расположены пиксельные триггеры. В пиксельном детекторе расположено примерно 50% процентов от всех каналов считывания всего внутреннего детектора.

Полупроводниковая система слежения – средний компонент внутреннего детектора. Принципиально и функционально он подобен пиксельному детектору, но отличается длинными узкими полосами, вместо маленьких пикселей. Размеры полос – 80мкм на 12,6 см.

Трековый детектор переходного излучения состоит из большого числа дрейфовых трубок – “straw” представляет собой трубочки 4мм в диаметре и 144 см в длину. Каждая “straw” заполнена газовой смесью, которая ионизируется при прохождении заряженной частицы.

Калориметры расположены вне соленоидального магнита, который окружает внутренний детектор. Их цель состоит в том, чтобы измерить энергию частиц, поглощая их. Есть две системы калориметров: внутренний электромагнитный калориметр и внешний адронный.

Электромагнитный калориметр поглощает энергию частиц, способных к электромагнитному взаимодействию. Поглощающим энергию материалом является свинец и нержавеющая сталь, а чувствительным веществом – жидкий

аргон. Электромагнитный калориметр находится в криостате вместе с магнитной системой и внутренним детектором.

Адронный калориметр поглощает энергию частиц, которые проходят электромагнитный калориметр, но подвержены сильному взаимодействию. Поглощающим энергию материалом является сталь, а выделенная энергия измеряется в сцинтилляционных пластинах.

Мюонный спектрометр – система трекинга больших размеров. Его огромный размер требуется для точного измерения импульса мюонов, которые проникают через другие элементы детектора. Он работает подобно внутреннему детектору, отклоняя мюоны так, чтобы можно было измерить их импульс, хотя имеет другую конфигурацию магнитного поля.

Детектор ATLAS использует две системы магнитов, чтобы отклонять заряженные частицы так, чтобы детекторы смогли измерить их импульсы и заряды.

Внутренний соленоид окружает внутренний детектор. Он производит магнитное поле величиной в 2 Тл. Столь сильное поле позволяет даже очень энергичным частицам отклоняться достаточно для измерения их импульса, и его почти однородное поле позволяет проводить очень точные измерения.

Внешнее тороидальное магнитное поле создается восемью очень большими сверхпроводящими катушками с воздушным сердечником и двумя заглушками, все расположены вне калориметров и в пределах мюонной системы. Его магнитное поле неоднородно, потому что соленоидальный магнит достаточного размера был бы предельно дорог для создания.

Глава 3. Анализ распадов топ кварков в pp соударениях на Большом адронном коллайдере

3.1. Критерии отбора событий для анализа

В работе были использованы данные проекта Open data⁹. Целью этого проекта является популяризация физики элементарных частиц и предоставление возможности любому человеку научиться работать с данными, полученными на детекторе¹⁰. В 2016 году Atlas открыл возможность исследование данных, собранных на эксперименте на детекторе Atlas в 2012 году с энергией столкновения 8 ТэВ и интегральной светимостью $1,007 \pm 0,019 \text{ фб}^{-1}$. В 2020 году на портале Open data появилась возможность анализа данных, собранных в эксперименте Atlas в 2016 году с интегральной светимостью $10,06 \pm 0,37 \text{ фб}^{-1}$. Также было увеличено количество наборов моделированных данных с 44 до 120. Анализ данных проводился, используя операционную систему Linux, а также программным пакетом ROOT и языком программирования Python с использованием библиотеки PyRoot. Совместно с экспериментальными и наборами моделированных данных в проекте Open data представлены методы их обработки.

Данные представлены в виде наборов событий, в которые включены кинематические данные о всех частицах, входящих в это событие. Они были отобраны с наложением специальных критериев¹¹:

- сработал один мюонный или электромагнитный триггер
- основная вершина имеет не менее 5 треков
- присутствует хотя бы один хороший лептон с $p_T > 25 \text{ ГэВ}$
- лептоны должны быть изолированы в конусе с параметрами $ptcone30$ и $ptcone20 < 0,15$)

⁹ ATLAS Experiment Outreach, URL: <http://opendata.atlas.cern>

¹⁰ CERN News Website. CERN makes public first data of LHC experiments, Geneva, 2014 URL: <https://home.cern/new>

¹¹ ATLAS OpenData Portal, URL: <http://opendata.atlas.cern/books/>

- события включены в «список хороших пробегов» (Good Run List – GRL)
- Исключение событий с «плохими» струями. Плохие струи — это струи, не связанные с частицами, возникающими в результате первичного столкновения протонов. Они возникают из различных источников, в пределах от условий пучка LHC и ливней космических лучей.

Для нашего исследования интересны события, в которых происходит рождение пары топ кварков. Мы рассматриваем пары топ кварков, которые имеют лептон-струйный канал распада. В этих событиях топ кварк распадается на b – кварк и W – бозон, который распадается в одном случае на пару кварк-антикварк, а во втором на лептон и нейтрино.

$$t\bar{t} \rightarrow W^+ b W^- \bar{b} \rightarrow l \nu_l b q \bar{q} \bar{b}$$

Для отбора событий с энергией 13 ТэВ, в которых рождаются пара $t\bar{t}$ и распадаются по лептон–струйному каналу, накладываются критерии:

- Только один хороший лептон с $p_T > 30$
- Минимум 4 хорошие струи
- По меньшей мере две b -меченые струи (MV2c10@70%)
- Величина недостающей поперечной энергии $E_T^{\text{нед}} > 30 \text{ GeV}$
- Реконструированная поперечная масса $m_T(W) > 30 \text{ GeV}$

Для событий с энергией 8 ТэВ применялись такие же критерии за исключением:

- Только один хороший лептон с $p_T > 25 \text{ GeV}$
- По меньшей мере две b -меченые струи (MV1@70%)

Используя данные критерии отбора, для данных с энергией 13 ТэВ из 168,5 млн. событий было отобрано 272 тыс. событий (1,6%), а для данных с энергией 8 ТэВ из 1 500 000 событий было отобрано 6879 событий (0,45%).

3.2 Идентификация b-струй.

3.2.1 Метод MV1 для анализа данных с энергией 8 ТэВ.

В эксперименте с энергией 8 ТэВ был использован алгоритм идентификации b-струи – MV1. Он состоит из объединения двух алгоритмов идентификации. Оба алгоритма сводятся к поиску вторичной вершины распада t-кварка, которая является распадом b-кварка. В следствии того, что b-кварк является достаточно долгоживущим, что за время его жизни он пролетает около 3 мм от точки столкновения протонов¹².

Одним из алгоритмов является JetProb. Он заключается в поиске вторичных вершин, от частиц, на которые может распасться b-кварк. Этот алгоритм на основе искусственного интеллекта определяет положение точки распада и ищет соседние струи от этого распада.

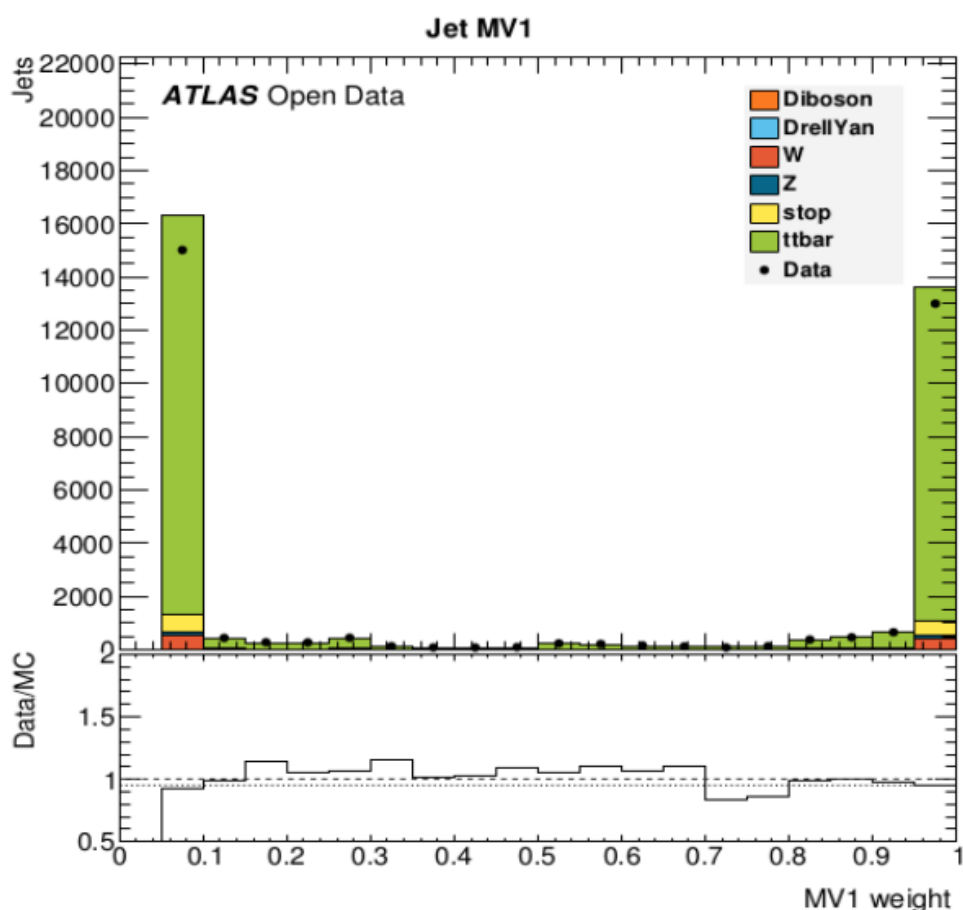


Рис. 3.1.1 Распределение по величине MV1 – вероятность, что данная струя – b-струя.

¹² The ATLAS Collaboration Performance of b-Jet Identification in the ATLAS Experiment // 2016.

Вторым алгоритмом поиска b-кварка, является – SV1. Он основан на поиске вторичной вершины используя все струи и частицы, образованные в событии. Происходит перебор комбинаций струй, с учетом инвариантной массы этих струй, которая сравнивается с табличными значениями массы b-кварка, а также происходит проверка по заряду частиц.

Алгоритм поиска b-струи MV1 основан на комбинации данных двух алгоритмов с использованием искусственного интеллекта. Происходит комбинация вероятностей в двух методах детектирования b-струй. И если данная величина больше 70%, то струя помечается как b-струя.

На рис. 3.1.1 изображена вероятность идентификации b-струи. На рисунке видно, что мы имеем достаточно мало событий со значением MV1 близким к границе идентификации b-струи ($MV1 = 70\%$).

3.2.2 Метод MV2 для анализа данных с энергией 13 ТэВ.

В эксперименте с энергией 13 ТэВ был использован алгоритм идентификации b-струи – MV2. Он состоит из объединения трех алгоритмов идентификации (алгоритм маркировки на основе прицельных параметров (IP2D и IP3D), инклюзивный алгоритм восстановления вторичных вершин (SV) и алгоритм реконструкции многовершинной точки распада (JetFitter))¹³.

Алгоритм маркировки на основе прицельных параметров (IP2D и IP3D) основан на параметрах поперечного удара (d_0), который определяется как расстояние наибольшего сближения в плоскости r-φ трека с главной вершиной и параметрах продольного удара ($z_0 \sin\theta$), который определяется как расстояние до главной вершины в продольной плоскости в точке наибольшего сближения по r-φ. Параметр IP2D использует величину поперечного прицельного параметра d_0/σ_{d_0} , в качестве дискриминирующей переменной, тогда как IP3D использует величину поперечного и продольного ударного параметра, $z_0 \sin \theta / \sigma_{z_0 \sin \theta}$.

¹³ The ATLAS Collaboration Optimization of the ATLAS b-tagging performance for the 2016 LHC Run// 2016.

Вторым алгоритмом поиска b -кварка, является – SV. Он основан на поиске вторичной вершины используя все струи и частицы, образованные в событии. Происходит перебор комбинаций струй, с учетом инвариантной массы этих струй, которая сравнивается с табличными значениями массы b -кварка, а также происходит проверка по заряду частиц. Данный алгоритм является модифицированной версией алгоритма SV1 из метода MV1.

Алгоритм многовершинной реконструкции цепочки распадов (JetFitter), использует топологическую структуру распадов b - и c -адронов внутри струи и пытается восстановить полную цепочку распадов b -адронов. Фильтр Калмана используется для нахождения общей линии, на которой лежат первичная вершина и вершины от распадов b - и c -адронов, аппроксимируя траекторию полета b -адрона, а также их положения. При таком подходе вершины b - и c -адронов, могут быть определены, даже если к любому из них прикреплен только один трек.

Имеются три варианта MV2, MV2c00, MV2c10 и MV2c20, где имена тегов указывают долю c -адронов в обучении, например в MV2c20 фоновый образец состоит из 20% струй c -адронов. Учитывая, что большинство физических анализов в настоящее время в большей степени ограничено отклонением струи от c -кварка, а не световым ароматом, фракция фона c -адрона в обучении была выбрана таким образом, чтобы усилить подавление очарования за счет сохранения аналогичного света. В данном исследовании был использован параметр MV2c10 с долей c -адронов в обучении в размере 7%, так что при обучении использовались данные b -струй в качестве сигнала совместно с фоном, который состоял из смеси струй с легким ароматом (93%) и c -струй в качестве фона (7%).

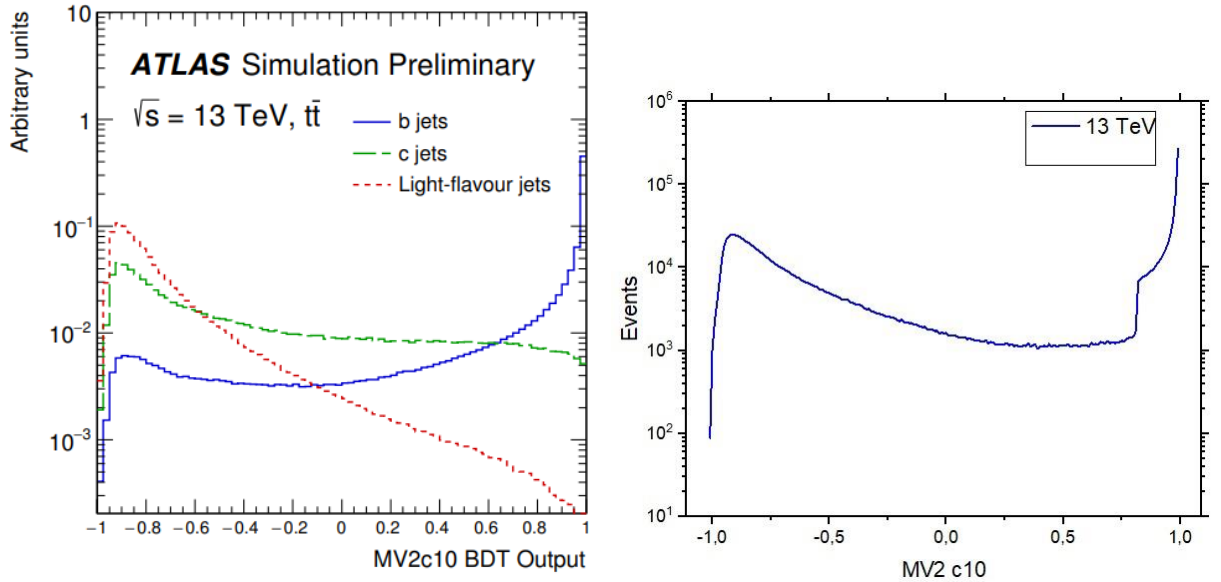


Рис. 3.2.2 (слева) Выходной сигнал MV2c10 для струй b- (сплошной синий), c- (зеленый пунктир) и легкого аромата (красный пунктир). (справа) Сигнал, полученный при анализе параметра MV2c10 на данных эксперимента pp соударений с энергией 13 ТэВ.

3.3. Общие характеристики событий с рождением пары топ кварков

На основе предоставленных данных и отобранных событий были построены распределения лептонов и струй по поперечному импульсу p_T для событий с энергиями 13 и 8 ТэВ. Данные распределения приведены на рис. 3.3.1 и 3.3.2. Из распределений видно, что максимумы распределений в гистограммах располагаются на значениях поперечных импульсов 20-40 ГэВ и данные эксперимента хорошо согласуются с результатами моделирования. Пик в распределениях по поперечному импульсу струй в событиях с энергией 13 ТэВ (слева) смещен на 5-10 ГэВ в область более низких энергий по сравнению с событиями с энергией 8 ТэВ (справа). В нижней части рисунков показано отношение экспериментальных данных к моделированным. Отношение близко к единице, однако при больших p_T наблюдается превышение числа событий при модельных расчетах. Эти отклонения находятся в пределах двойной статистической погрешности.

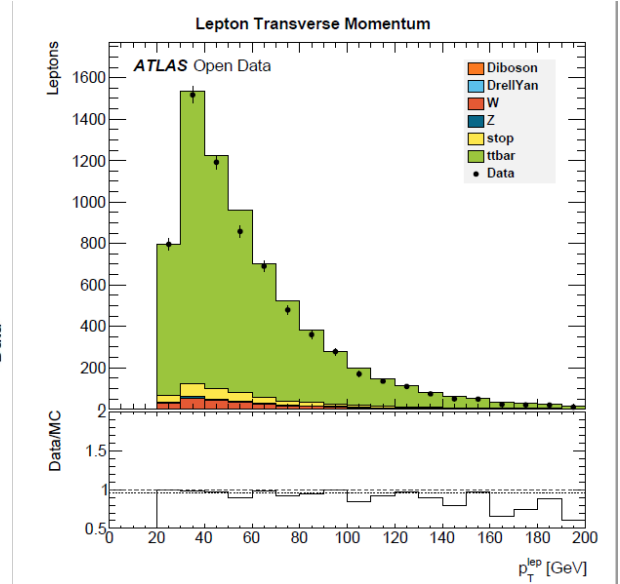
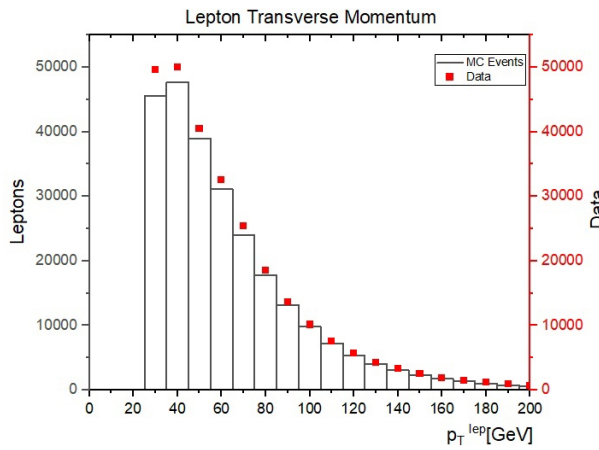


Рис. 3.3.1 Распределение по поперечным импульсам лептонов для лептон-струйных распадов пар топ кварков в pp соударениях при энергии (слева) 13 ТэВ и (справа) 8 ТэВ. Точками показаны экспериментальные данные, цветные гистограммы соответствуют моделированным событиям.

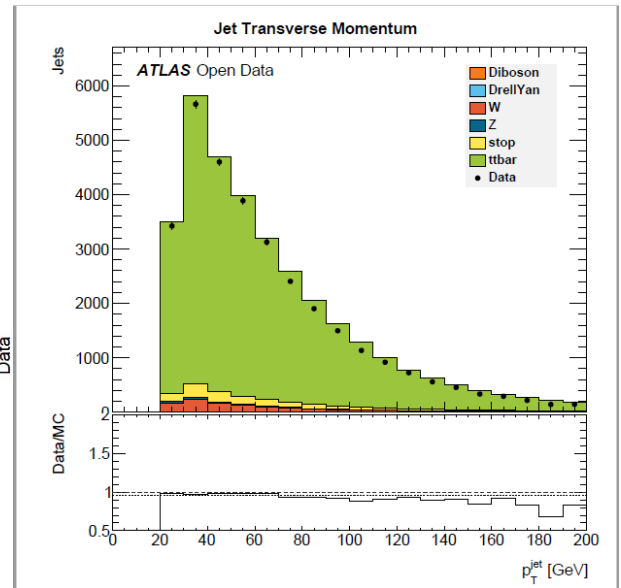
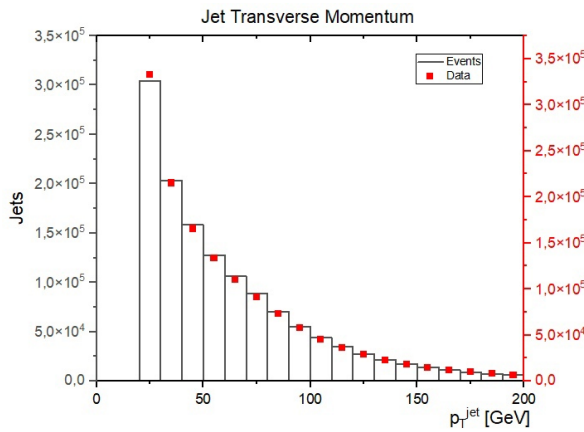


Рис. 3.3.2 Распределение по поперечным импульсам струй для лептон-струйных распадов пар топ кварков в pp соударениях при энергии (слева) 13 ТэВ и (справа) 8 ТэВ. Точками показаны экспериментальные данные, цветные гистограммы соответствуют моделированным событиям.

Среди продуктов распада по лептон-струйному каналу присутствуют один заряженный лептон, нейтрино или антинейтрино и струи образовавшиеся от адронного распада W – бозона и адронизации двух b – кварков. Таким

образом количество струй в событиях может быть 4 или больше. На рис. 3.3.3 приведено распределение отобранных для анализа событий по количеству струй в событиях с энергиями 13 и 8 ТэВ. В большинстве событий имеется только 4 струи, но есть события в которых число струй достигает 9. Также при увеличении энергии взаимодействия с 8 до 13 ТэВ увеличилась доля событий с 5 и более струями.

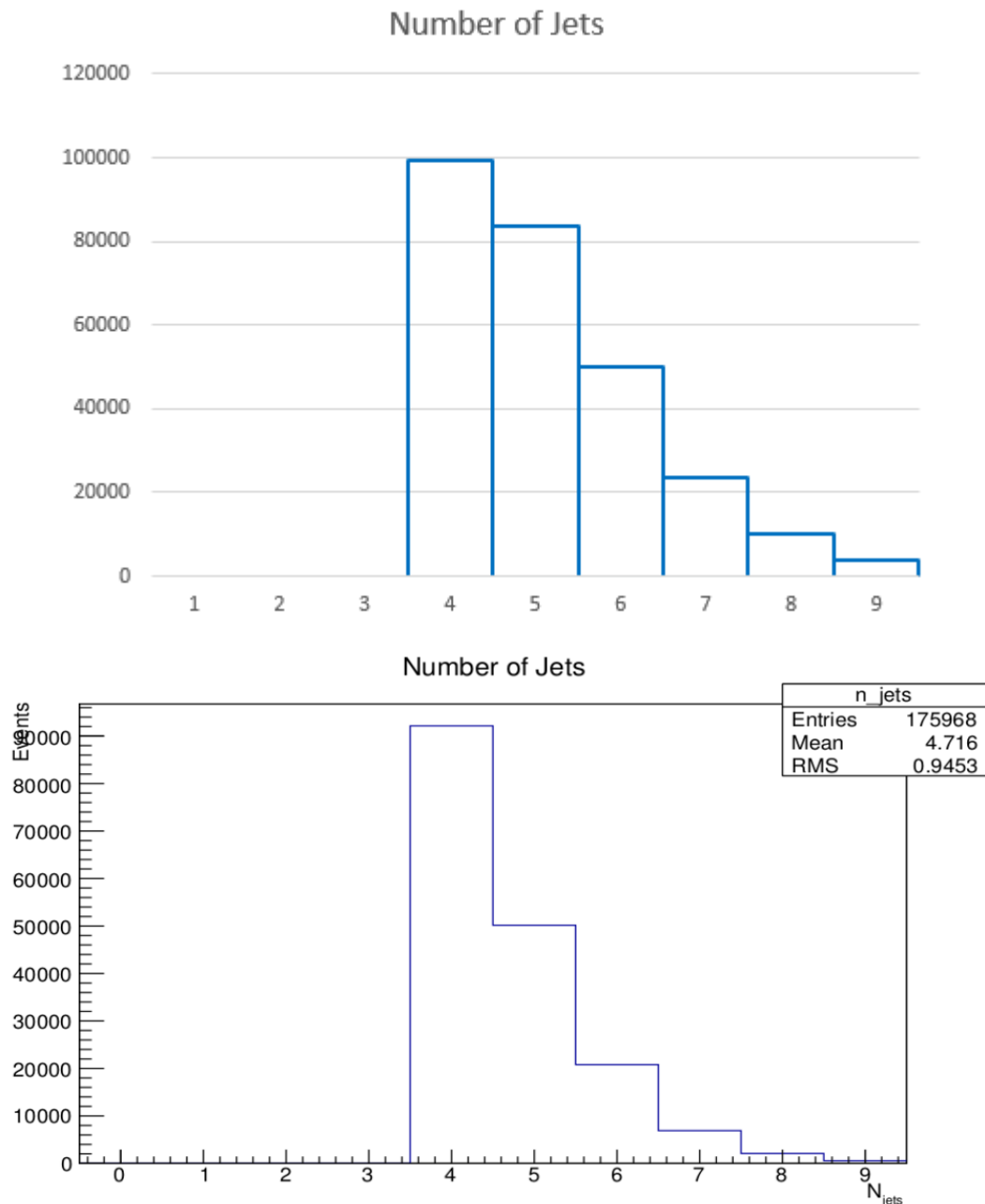


Рис 3.3.3. Распределение по количеству струй в событиях с рождением пары топ кварков с распадом их по лептон-струйному каналу с энергиями 13 ТэВ (сверху) и 8 ТэВ (снизу).

Важной характеристикой лептон-струйных распадов пар топ кварков является величина потерянной поперечной энергии E_T^{miss} . Распределения по величине E_T^{miss} приведены на рис. 3.3.4 слева для событий с энергией 13 ТэВ, а справа для событий с энергией 8 ТэВ. Данные распределения схожи и имеют пик при энергии 40-50 ГэВ. Также приведены распределения по величине E_T^{miss} на рис. 3.3.5 слева в pp взаимодействии при энергии 13 ТэВ, для сравнения на рис. 3.3.5 справа показано распределение по поперечной энергии E_T^{miss} с рождением Z - бозонов. В событиях с рождением топ кварков наблюдаются большие значения E_T^{miss} по сравнению с событиями с Z - бозонами. Это связано с тем, что в событиях с топ кварками присутствуют нейтрино, которые уносят большое количество энергии.

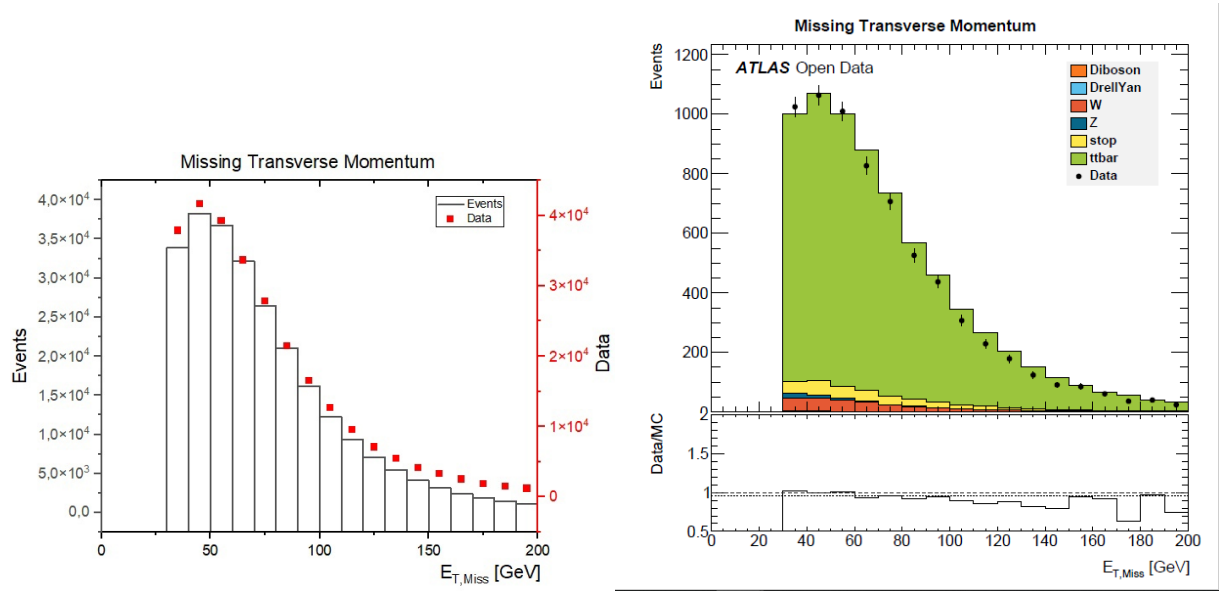


Рис. 3.3.4. Распределение по потерянной поперечной энергии для лептон-струйных распадов пар топ кварков при энергии 13 ТэВ (слева) и энергии 8 ТэВ (справа) в pp соударениях. Точками показаны экспериментальные данные, цветные гистограммы соответствуют моделированным событиям.

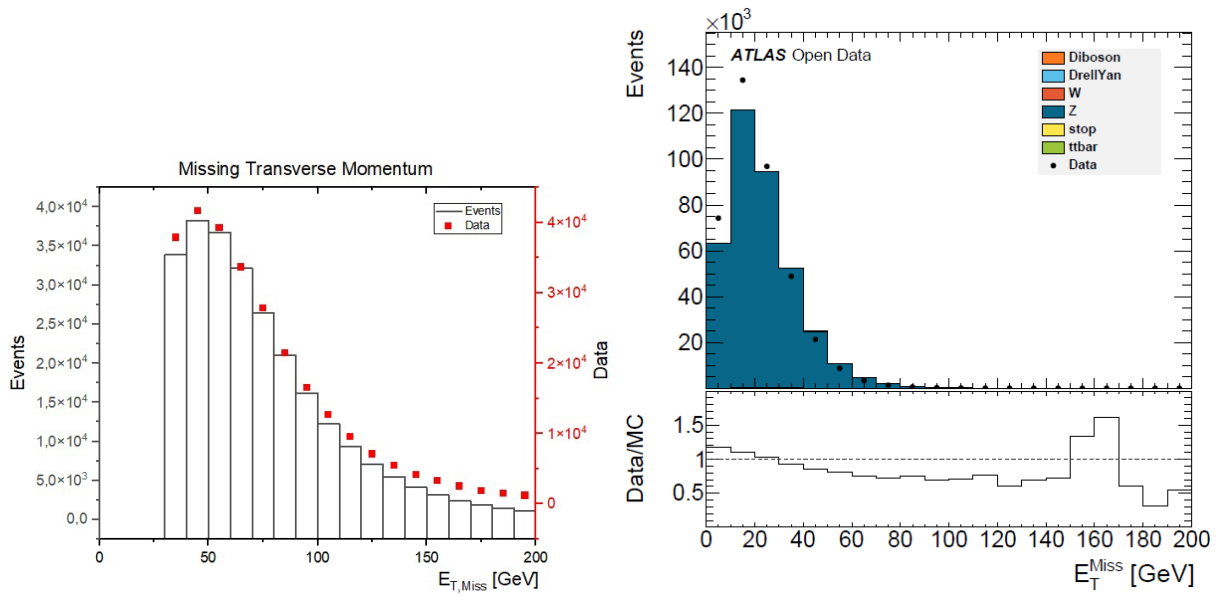


Рис. 3.3.5. Распределение по потерянной поперечной энергии для лептон-струйных распадов пар топ кварков (слева) и распада Z-бозонов (справа) в pp соударениях при энергии 8 ТэВ. Точками показаны экспериментальные данные, цветные гистограммы соответствуют моделированным событиям¹⁴.

3.4. Характеристики W – бозона от распада топ кварка по лептонному каналу.

Из имеющихся данных были рассчитаны значения азимутальных углов разлета между продуктами лептонного распада W – бозона. Эти значения характеризуют поперечный импульс W – бозона. Для покоящегося W – бозона азимутальный угол между лептоном и нейтрино составляет 180 градусов, а при больших p_T W – бозона азимутальный угол между продуктами распада должен уменьшаться. Рассчитанные значения азимутального угла приведены на рис. 3.4.1. Для большей части событий с энергией 8 ТэВ азимутальный угол между лептоном и нейтрино заключен в диапазоне от 90 до 180 градусов, а для событий с энергией 13 ТэВ для большей части событий азимутальный угол между лептоном и нейтрино расположен от 30 до 100 градусов с пиком в 50

¹⁴ Волков И. О. Дьячков И. С. Смирнова Л. Н. Шоркин Р. А. Характеристики событий соударений протонов в открытых данных эксперимента ATLAS. // Ученые записки физического факультета Московского Университета. 2018.

градусов. Минимальное значение азимутального угла между лептоном и нейтрино достигают порядка 10 – 20 градусов.

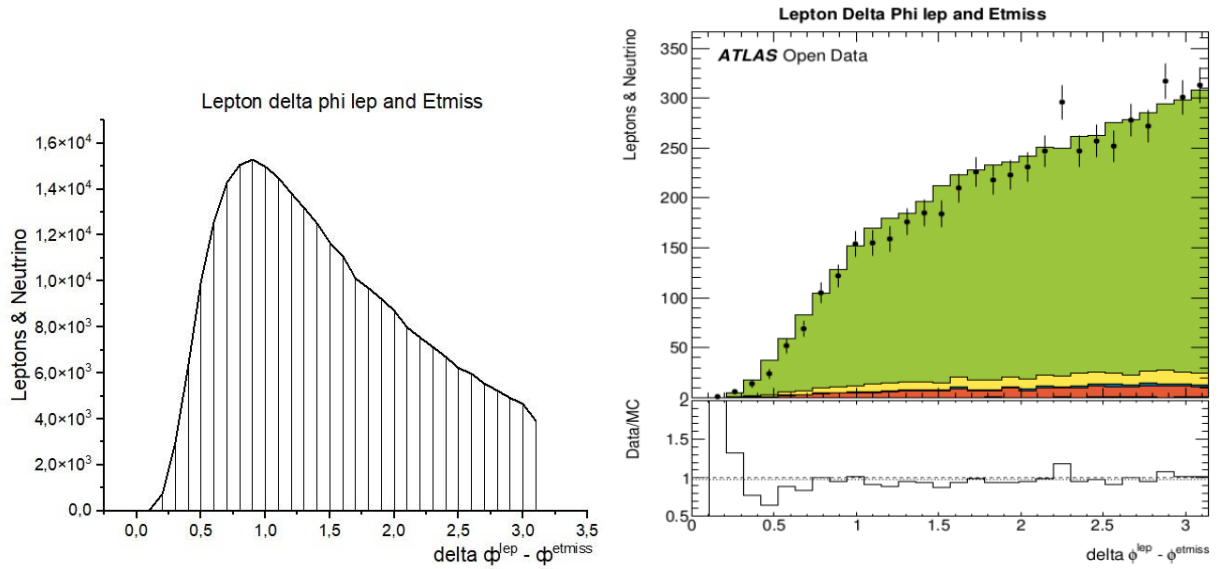


Рис. 3.4.1. Распределение по азимутальному углу между лептоном и нейтрино в событиях с лептон-струйным распадом пар топ кварков в pp соударениях при энергии (слева) 13 ТэВ и (справа) 8 ТэВ.

Из измерений можно посчитать поперечную массу W – бозона. Полную массу W – бозона получить из этих данных невозможно, так как мы не можем рассчитать потерянную продольную энергию.

$$M_T^W = \sqrt{2p_{T,l}E_T^{miss}(1 - \cos \varphi(l, E_T^{miss}))} \quad (3.4.1)$$

где M_T^W – поперечная масса W – бозона, $p_{T,l}$ – поперечный импульс лептона, E_T^{miss} – недостающая поперечная энергия.

Было построено распределение на рис. 3.4.2. слева для поперечной инвариантной массы W – бозона (M_T^W) для событий с энергией взаимодействия 13 ТэВ и справа для событий с энергией 8 ТэВ. Расчет данной величины производился по формуле 3.4.1. Для определения среднего значения поперечной массы W – бозона распределение было аппроксимировано функцией Гаусса. Из распределения по событиям с энергией 13 ТэВ было

получено значение поперечной массы W – бозона. Поперечная масса W – бозона меньше продольной и составляет 85% от полной массы бозона.

$$M_T^W = 68,57 \pm 0,92 \text{ ГэВ.}$$

Для событий с энергией 8 ТэВ, поперечная масса W – бозона составляет 93% от полной массы бозона и равна:

$$M_T^W = 74,8 \pm 0,9 \text{ ГэВ.}$$

На рис. 3.4.3. справа приведено распределение по поперечной массе W -бозона, полученное в pp соударениях на БАК при энергии 7 ТэВ. Данное распределение сходится полученным на основе данных эксперимента с энергией 13 ТэВ.

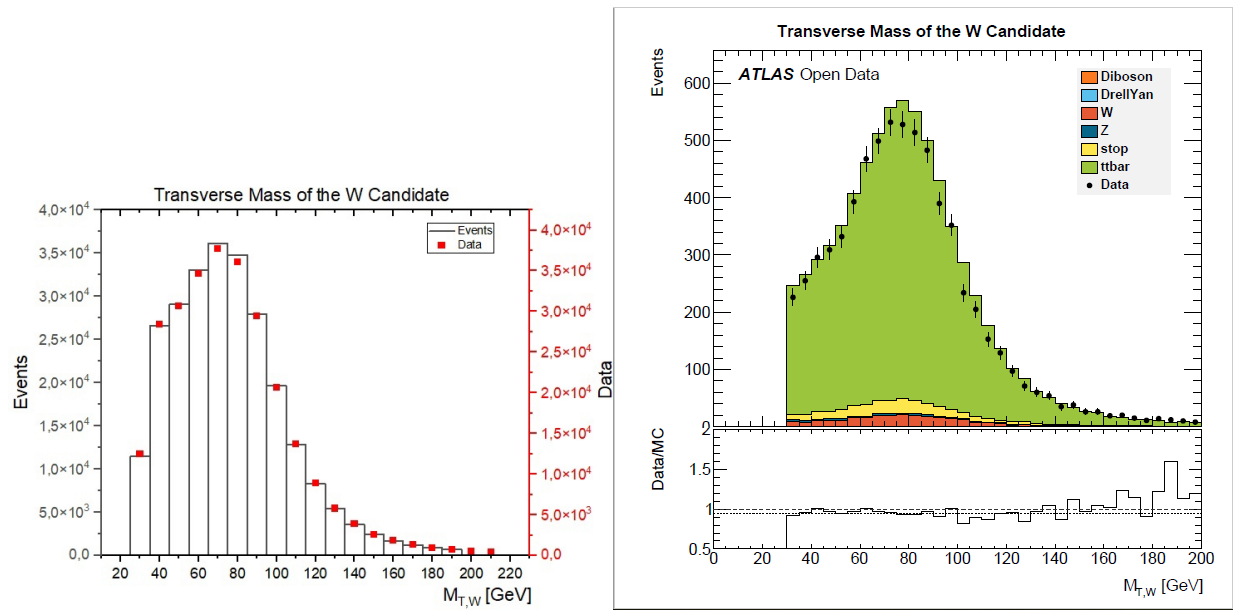


Рис 3.4.2. Распределение по поперечной инвариантной масс W -бозона образованная от лептон-адронного распада топ в pp соударении (слева) при энергии 13 ТэВ, (справа) при энергии 8 ТэВ.

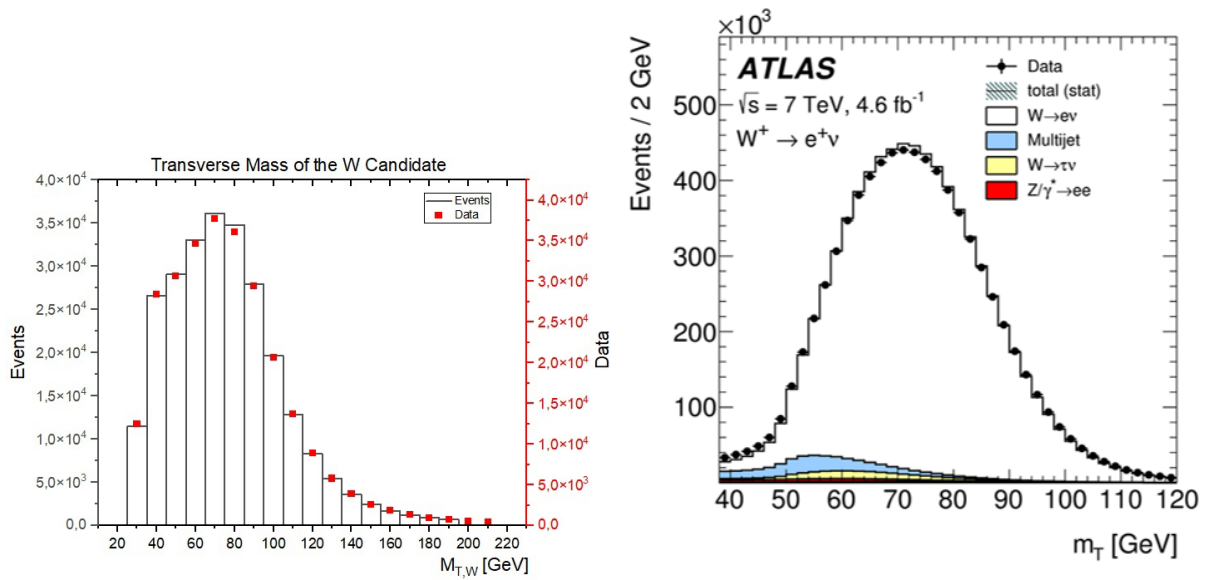


Рис 3.4.3. Распределение по поперечной инвариантной масс W-бозона (слева) образованная от лептон-адронного распада топ в pp соударении при энергии 13 ТэВ. Поперечная инвариантная масса W-бозона, полученная при энергии 7 ТэВ на БАК на детекторе ATLAS.

Был произведен расчет продольной массы W-бозона. Для событий с энергией 13 ТэВ она составляет $M_{||}^W = 41,915 \pm 1,535 \text{ ГэВ}$ (% полной массы W – бозона), а для событий с энергией 8 ТэВ - $M_{||}^W = 29,335 \pm 2,335 \text{ ГэВ}$ (36,5% полной массы W – бозона). Она составляет 36,5% от полной массы. Из этого можно сделать вывод, что в pp соударениях W-бозон имеет больший поперечный импульс, по сравнению с продольным и то, что при увеличении энергии столкновения, величина продольного поперечного импульса растет.

Глава 4. Измерение массы топ кварка из наблюдаемых величин.

4.1. Методика определение массы топ кварка в эксперименте ATLAS в pp соударениях при 8 ТэВ. Метод шаблонов.

В эксперименте ATLAS реальные измерения массы топ кварка при энергии взаимодействия 8 ТэВ проводилось при помощи метода шаблонов. При создании шаблонов, использовались экспериментальные распределения:

- Поперечный импульс лептонов
- Средний поперечный импульс струй в событии
- Поперечный импульс топ кварка, распавшегося по адронному каналу
- Поперечный импульс системы $t\bar{t}$ кварков
- Угловое расстояние R между струями от распада W бозона

После построение распределений, полученных на экспериментах, проводилось моделирование этих распределений при разных значениях полной массы топ кварка. По результатам сравнения экспериментальных и моделированных распределений, определялась величина массы топ кварка, при котором наблюдалось наилучшее согласие эксперимента и расчетов. Таким образом было получено значение¹⁵:

$$M^{top} = 172,08 \pm 0,39 \text{ ТэВ}$$

¹⁵ The ATLAS Collaboration Measurement of the top quark mass in the $t\bar{t} \rightarrow \text{lepton+jets}$ channel from $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$ ATLAS data and combination with previous results // 2019.

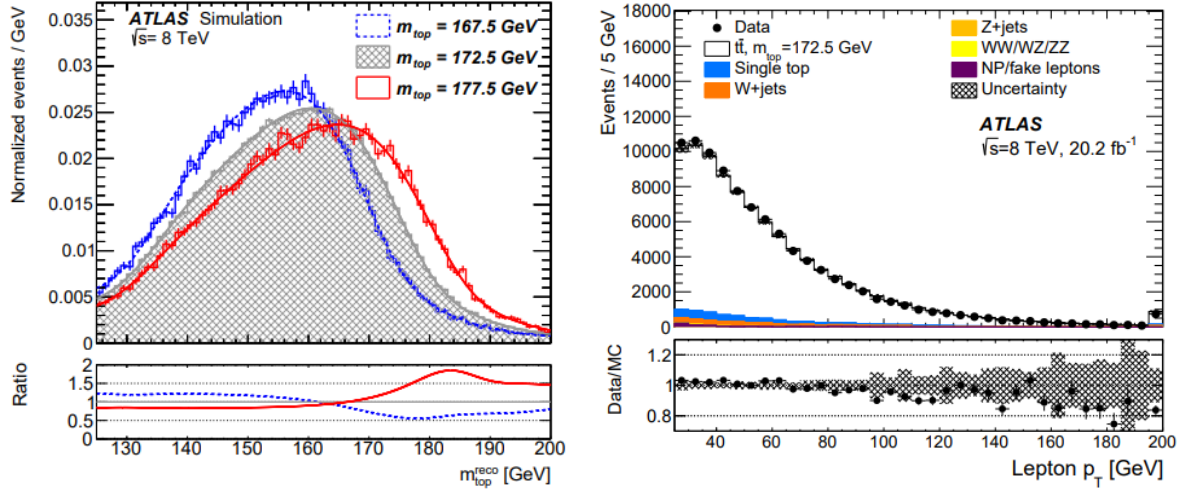


Рис. 4.1.1. Слева распределение по реконструированной массе топ кварка при разных значениях его массы. Справа моделированный график распределения по поперечному импульсу лептонов от распада топ кварка с массой 172,5 ГэВ.

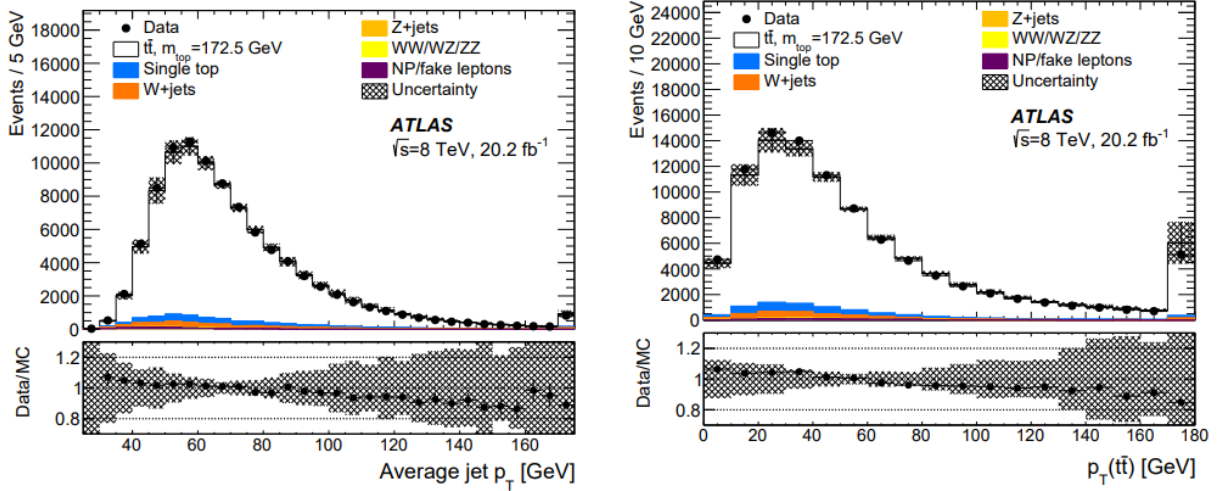


Рис. 4.1.2. Слева распределение, полученное на моделированных данных по среднему поперечному импульсу струй. Справа распределение, полученное на моделированных данных по поперечному импульсу пары топ-анти топ кварков.

4.2. Расчет поперечной массы топ кварка

В данном разделе проведен расчет поперечной массы топ кварка, распадающегося по лептонному каналу. Рассмотрим лептонный распад топ кварка. Он распадается на W – бозон и b – кварк, где бозон распадается на лептон и нейтрино.

$$t \rightarrow W^+ b \rightarrow l \nu_l b$$

Рассчитать полную массу топ кварка по его лептонному каналу распада невозможно, так как мы не знаем продольную составляющую энергии

нейтрино. В связи с этим было построено распределение для поперечной массы топ кварка.

$$\begin{aligned}
 M_T^{top^2} &= E_T^{top^2} - p_T^{top^2} = (E_T^W + E_T^b)^2 - (p_T^W^2 + p_T^b^2) \\
 &= E_T^W^2 - p_T^W^2 + E_T^b^2 - p_T^b^2 + 2E_T^W E_T^b - 2p_T^W p_T^b \cos(p_T^W p_T^b) \\
 &= m_T^W^2 + E_T^b^2 - p_T^b^2 + 2(E_T^l + E_T^{miss})E_T^b - 2p_T^W p_T^b \cos(p_T^W p_T^b)
 \end{aligned}$$

Было получено распределение для M_T^{top} . Мы видим широкий пик в районе 95 ГэВ. Пик является широким и присутствуют значение поперечной массы топ кварка больше самой массы кварка в связи с тем, что расчет массы осуществлялся по всем b – струям, а в наших событиях их минимум две. Мы не можем конкретно определить, какая b – струя была образована от лептонного распада топ кварка, а какая от адронного распада.

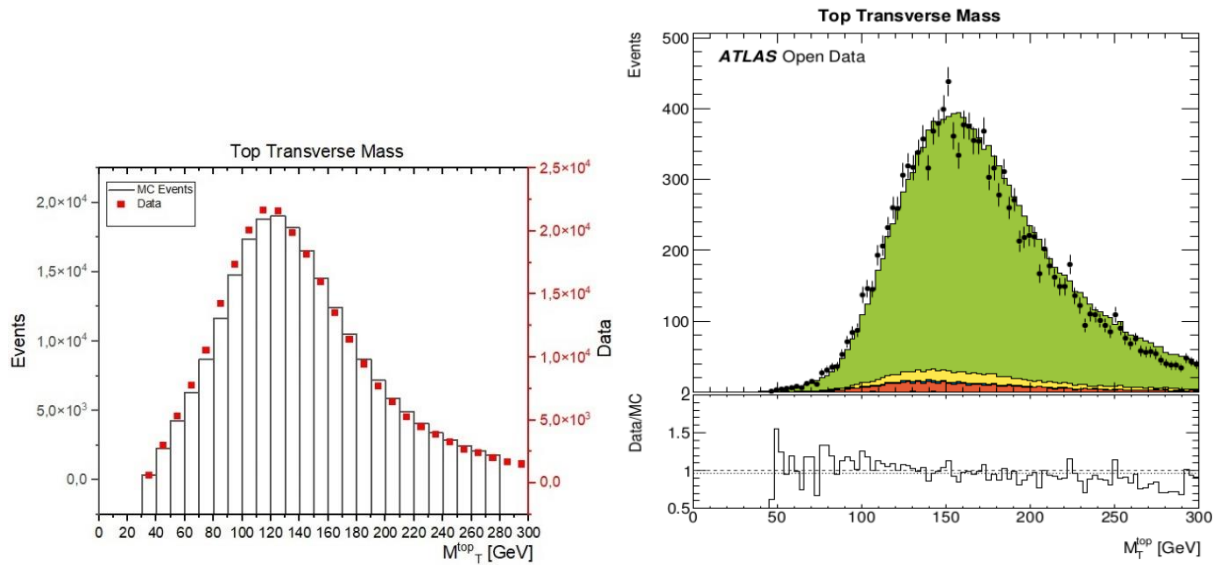


Рис. 4.2.1. Распределение по поперечной массе топ кварка рассчитанное по лептону распаду топ кварка в событиях с энергией (слева) 13 ТэВ и (справа) 8 ТэВ.

Аппроксимировав распределение Гауссом, было получено значение поперечной массы t – кварка для событий с энергией 13 ТэВ:

$$M_T^{top} = 121,69 \pm 0,75 \text{ ГэВ}$$

Для событий с энергией 8 ТэВ, поперечная масса t – кварка равняется:

$$M_T^{top} = 155,9 \pm 0,8 \text{ ТэВ}$$

При этом значение продольной массы t – кварка для событий с энергией 13 ТэВ равна:

$$M_{||}^{top} = 121,66 \pm 1,30 \text{ ТэВ}$$

А для событий с энергией 8 ТэВ равна:

$$M_{||}^{top} = 73,78 \pm 2,86 \text{ ТэВ}$$

Продольная составляющая массы топ кварка больше поперечной и при энергии 13 ТэВ составляет 70,7% от полной массы и равна поперечной массе. Для событий с энергией 8 ТэВ поперечная масса топ кварка составляет 42,77% от полной массы, а поперечная масса составляет 90,38% от полной.

4.3. Определение массы топ кварка и W - бозона по инвариантной массе трех и двух струй, соответственно.

При адронном канале распада топ кварка образуются три струи, одна из которых b – струя, а две других от распада W - бозона. Так же в наших событиях присутствует еще одна b – струя от лептонного канала распада топ кварка. В связи с этим мы отбираем события, в которых ≥ 4 струй. Но в наших отобранных данных присутствуют события, в которых более четырех струй.

Инвариантная масса двух струй, образованных не от b – кварка, составляют массу W – бозона. При этом только одна комбинация в событии будет соответствовать массе W – бозона.

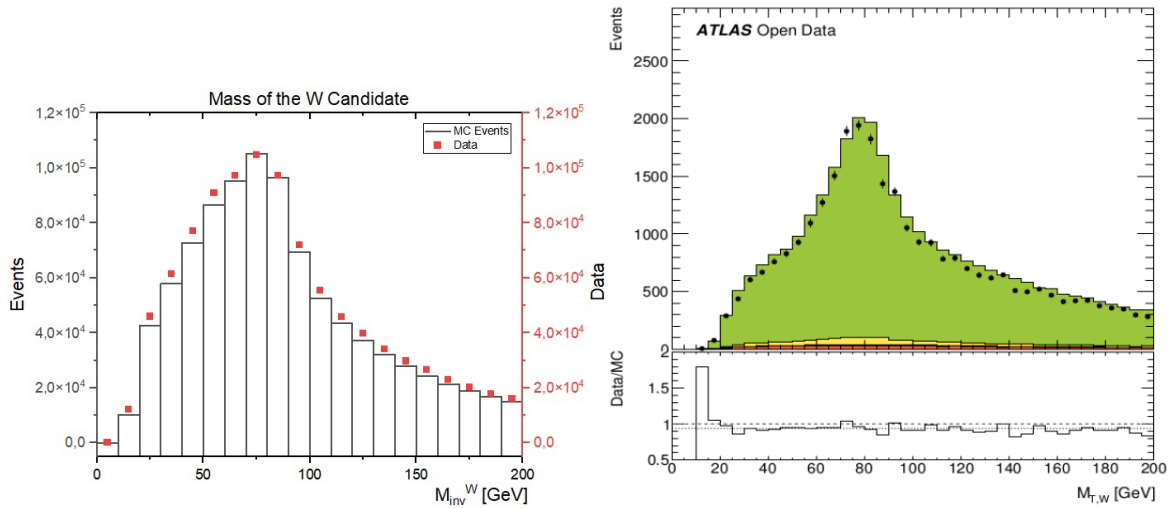


Рис. 4.3.1. Распределение по инвариантной массе двух струй, которые являются кандидатами W – бозона с энергией взаимодействия (слева) 13 ТэВ и (справа) 8 ТэВ.

Полученное распределения инвариантной массы пар струй (кандидата W – бозона) приведено на Рис 4.3.1. На рисунке справа виден отчётливый максимум, соответствующий массе W – бозона, а на распределении слева ширина пика значительно больше. Это связано с тем, что в событиях с энергией 13 ТэВ имеется больше событий с 5 и более струями, чем в событиях с энергией 8 ТэВ и количество неправильных комбинаций формирует данное уширение распределения. Аппроксимация максимума с помощью Гаусса дает значение массы W – бозона в событиях с энергией 8 ТэВ:

$$M^W = 82,1 \pm 0,6 \text{ ГэВ}$$

При энергии 13 ТэВ аппроксимировав максимум с помощью функции Гаусса дает значение массы W – бозона:

$$M^W = 82,0 \pm 1,5 \text{ ГэВ}$$

В связи с тем, что присутствуют ложные комбинации струй, мы видим большое плато, но в интервале массы W - бозона виден пик в районе 80 ГэВ. Аппроксимировав график Гауссом, мы получили значение массы W – бозона. Мы получили значение, совпадающее с табличным значение с учетом погрешности. Большая погрешность и расхождение с табличными значениями связано с тем, что в наших событиях присутствуют ложные комбинации струй.

Для расчета инвариантной массы топ кварка мы будем искать инвариантную массу одной b – струи и двух других не b - струй. Так как в наших событиях две b – струи, и бывает больше 2-х струй, образованных не от b – кварка, у нас будут комбинации, которые не будут принадлежать к адронному распаду топ кварка.

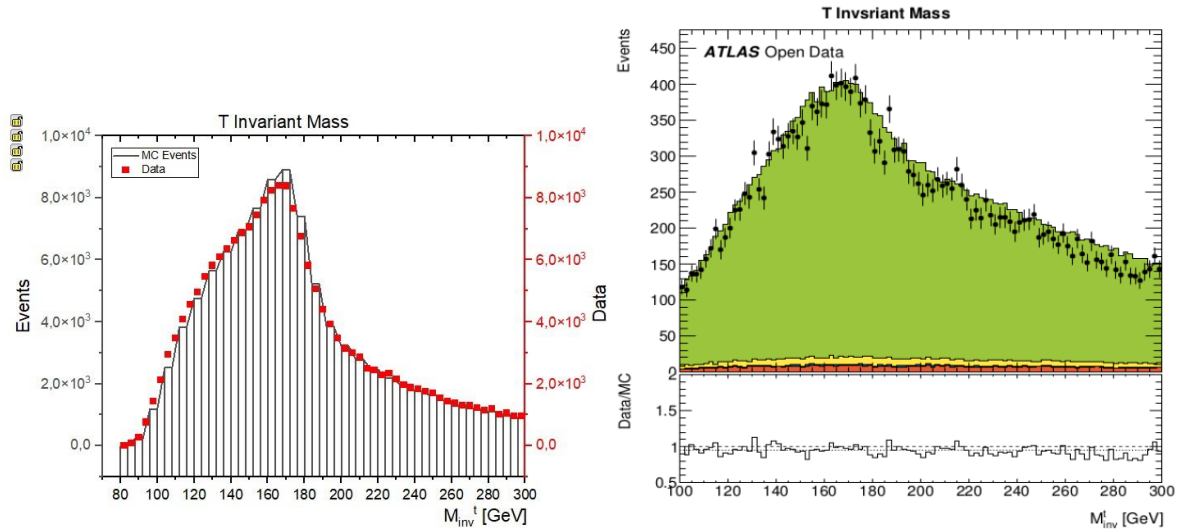


Рис. 4.3.2. Распределение по инвариантной массе трех струй, одна из которых b -струя, а две другие, не b – струи в событиях с энергией взаимодействия (слева) 13 ТэВ и (справа) 8 ТэВ.

На графике инвариантной массы топ кварка мы видим максимум, а затем плавно падающий широкий хвост. Это связано с тем, что имеется большое количество «ложных» комбинаций струй. Виден пик в районе массы топ кварка и аппроксимировав распределение с энергией 8 ТэВ Гауссом, получаем оценку массы топ кварка.

$$M^{top} = 176,9 \pm 3,7 \text{ ГэВ}$$

Для событий с энергией 13 ТэВ значение массы топ кварка, полученное аппроксимацией функцией Гауса пика в полученном распределении, совпадает с величиной, полученной при энергии 8 ТэВ, но с большей погрешностью за счет большего числа ложных событий. Масса топ кварка для событий с энергией 13 ТэВ составляет:

$$M^{top} = 176,94 \pm 4,55 \text{ ГэВ}$$

Данные по массе t – кварка совпадают с учетом погрешности с табличными значениями массы топ кварка. Но из-за большого количества ложных комбинаций, мы получаем большую погрешность и небольшое несоответствие с табличными данными.

Расчёты массы топ кварка при энергии 13 и 8 ТэВ совпадают с учетом погрешности.

4.4. Расчет массы топ кварка по инвариантной массе трех струй в событиях с четырьмя струями.

Для уменьшения числа ложных комбинаций, были отобраны события, в которых только 4 струи, две из которых являлись b – струями, а две другие, не являлись. В этом случае у нас имеется только одна комбинация для определения массы W – бозона, и две комбинации для расчета инвариантной массы t – кварка. Инвариантная масса двух струй от распада W – бозона приведены на рис. 4.4.1. Отчетливо виден максимум при значении массы W – бозона. Средняя значение массы W – бозона для событий с энергией 8 ТэВ было получено путем аппроксимации функцией Гаусса и получено значение массы:

$$M^W = 80,7 \pm 0,6 \text{ ГэВ}$$

Аппроксимация максимума с помощью Гаусса для событий с энергией 13 ТэВ дает значение массы W – бозона:

$$M^W = 80,83 \pm 0,53 \text{ ГэВ}$$

Данные значения хорошо согласуются с табличными значениями для массы W – бозона. Полученное значение имеет меньшую погрешность, и лучше совпадает с табличными значениями.

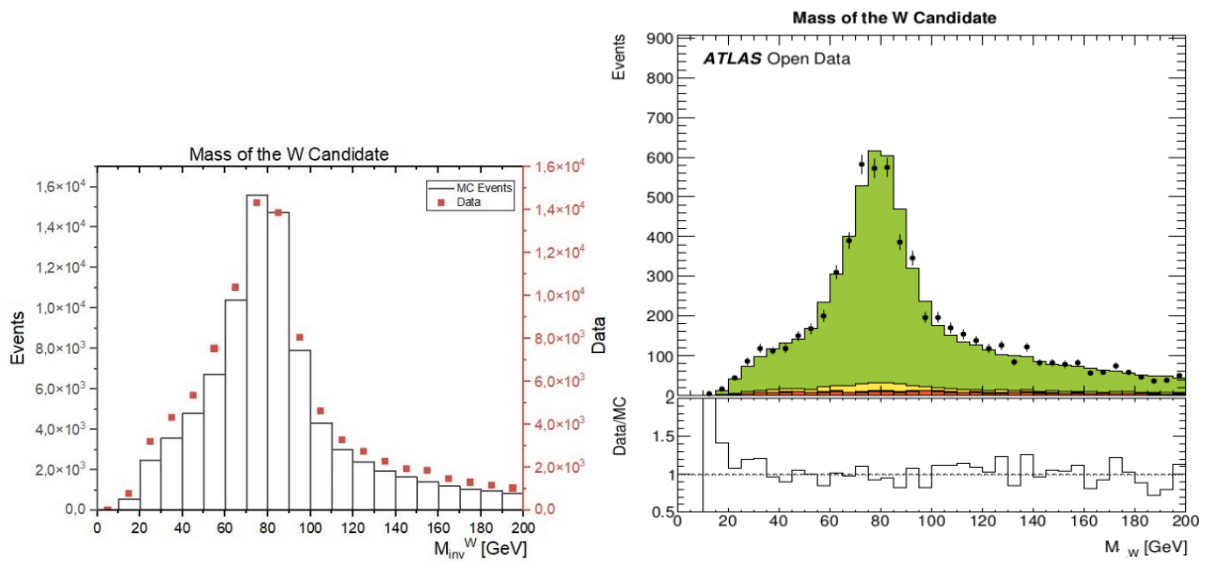


Рис. 4.4.1. Распределение по инвариантной массе двух струй, которые являются кандидатами W – бозона в событиях с энергией взаимодействия (слева) 13 ТэВ и (справа) 8 ТэВ, с дополнительными критериями отбора для количества струй.

Инвариантные массы трех струй, одна из которых была образована адронизацией b - кварка приведены на рис. 4.4.2. Максимум при значении массы топ кварка стал более отчетливым за счет уменьшения количества ложных комбинаций. В этом распределении присутствует только одна ложная комбинация, так как мы не можем определить какая b – струя относится к данному распаду топ кварка. Сравнивая данное распределение с приведенным на рис. 4.3.2. можно увидеть, что уменьшилось число комбинаций справа от максимума, но тем не менее плавно падающий хвост в области больших значений масс сохраняется. Можно предположить, что источником таких больших масс является ложная комбинация с b – кварком.

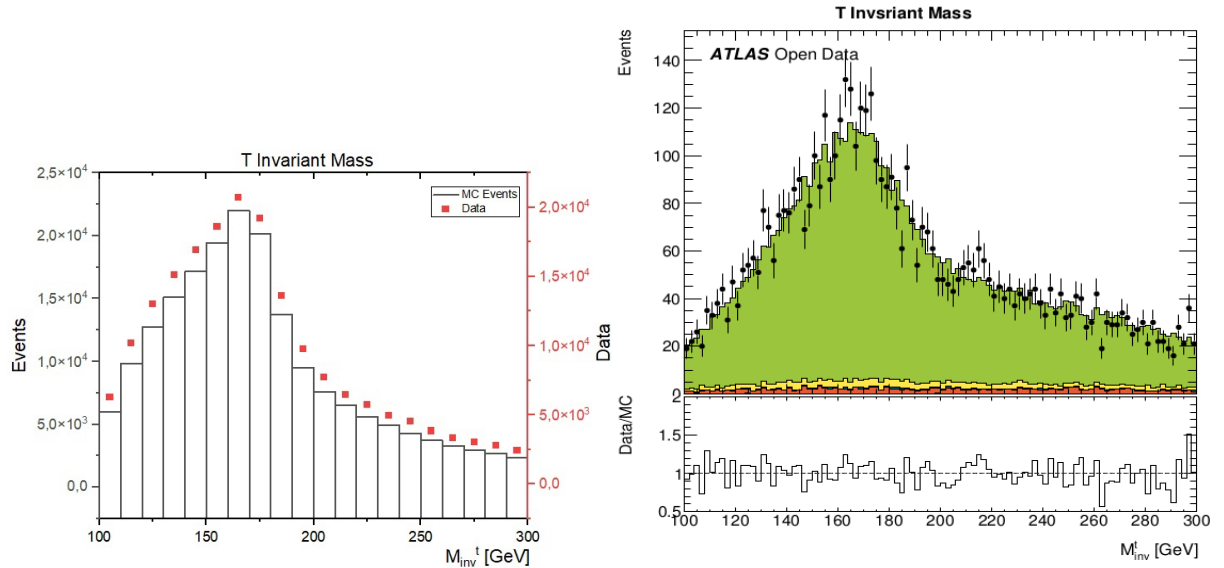


Рис. 4.4.2. Распределения по инвариантной массе трех струй, одна из которых b-струя, а две другие, не b – струи в событиях с энергией взаимодействия (слева) 13 ТэВ и (справа) 8 ТэВ. Они являются кандидатами в топ кварка. Данные получены с дополнительными критериями отбора для количества струй.

В распределении по инвариантной массе топ кварка наблюдается пик в районе массы кварка. Аппроксимировав это распределение, мы получили значение, совпадающее с учетом погрешности с табличными данными. Так же при «ужесточении» критериев отбора плато значительно уменьшилось и пик стал более явным.

$$M^{top} = 172,6 \pm 1,3 \text{ ГэВ}$$

Аппроксимировав распределение с энергией 13 ТэВ Гауссом, получаем оценку массы топ кварка.

$$M^{top} = 172,36 \pm 1,03 \text{ ГэВ}$$

Заключение

В работе выполнен анализ событий с рождением пары топ-анти топ кварков на открытых данных эксперимента ATLAS в pp соударениях при энергиях 8 и 13 ТэВ.

Построены и сравнены распределения по поперечному импульсу лептонов и струй, по количеству струй в событии, а также по углу между лептоном и E_T^{miss} . Построено распределение по недостающей поперечной энергии и проведено сравнение с данными, полученными в событиях с рождением Z – бозона.

Построено распределение для событий с энергией 8 и 13 ТэВ по поперечной массе W – бозона и путем аппроксимации данного распределения Гауссом получено численное значение его массы, равное $M_T^W = 68,57 \pm 0,92$ ГэВ для событий с энергией 13 ТэВ и $M_T^W = 74,8 \pm 0,9$ ГэВ для событий с энергией 8 ТэВ.

Получено распределение по поперечной инвариантной массе топ кварка, используя лептонный канал распада. Найдено численное значение поперечной массы топ кварка: для событий с энергией 13 ТэВ - $M_T^{top} = 121,69 \pm 0,75$ ГэВ, а для событий с энергией 8 ТэВ - $M_T^{top} = 155,9 \pm 0,8$ ГэВ.

Выполнен расчет инвариантной массы W – бозона и топ кварка. Получены следующие значения массы: для событий с энергией 13 ТэВ – $M^W = 82,0 \pm 1,5$ ГэВ и $M^{top} = 176,94 \pm 4,55$ ГэВ и для событий с энергией 8 ТэВ - $M^W = 82,1 \pm 0,6$ ГэВ и $M^{top} = 176,9 \pm 3,7$ ГэВ. Так же были получены те же значения масс при ужесточении критериев отбора: для событий с энергией 13 ТэВ – $M^W = 80,83 \pm 0,53$ ГэВ и $M^{top} = 172,36 \pm 1,03$ ГэВ и для событий с энергией 8 ТэВ - $M^W = 80,7 \pm 0,6$ ГэВ и $M^{top} = 172,6 \pm 1,3$ ГэВ.

Список литературы

1. T.M. Liss, F. Maltoni, A. Quadt The Top Quark (2017)
2. C. Patrignani et al. (Particle Data Group), Chin. Phys. C, 40, 100001 (2016)
3. Rebeca Gonzalez Suarez LHC results on Top Quark Physics // 2018.
4. Л.Н. Смирнова. “Эксперимент ATLAS Большого адронного коллайдера” Москва, 2014
5. The ATLAS Collaboration Top Working Group Summary Plots —2019 // ATLAS PUB Note. 2019.
6. K. Nakamura et al. (Particle Data Group), JPG 37, 075021 (2010)
7. Слабоспицкий С.Р. ФИЗИКА ТОП-КВАРКОВ НА БОЛЬШОМ АДРОННОМ КОЛЛАЙДЕРЕ // Международная Сессия-конференция Секция ядерной физики ОФН РАН. 2016.
8. Л.Н. Смирнова. “Детектор ATLAS Большого адронного коллайдера”. Москва, 2010
9. ATLAS Experiment Outreach, URL: <http://opendata.atlas.cern>
10. CERN News Website. CERN makes public first data of LHC experiments, Geneva, 2014 URL: <https://home.cern/new>
11. ATLAS Open Data Portal, URL: <http://opendata.atlas.cern/books/>
12. The ATLAS Collaboration Performance of b-Jet Identification in the ATLAS Experiment // 2016.
13. The ATLAS Collaboration Optimization of the ATLAS b-tagging performance for the 2016 LHC Run// 2016.
14. Волков И. О. Дьячков И. С. Смирнова Л. Н. Шоркин Р. А. Характеристики событий соударений протонов в открытых данных эксперимента ATLAS. // Ученые записки физического факультета Московского Университета. 2018.
15. The ATLAS Collaboration Measurement of the top quark mass in the $t\bar{t} \rightarrow lepton + jets$ channel from $\sqrt{s} = 8$ TeV ATLAS data and combination with previous results // 2019.